

مدلسازی عددی و اعتبار سنجی آزمایشگاهی در تعیین چقرمگی مود بازشونده ترک در بتن با استفاده از آزمایش دیسک برزیلی درزه دار

هادی حائری

پژوهشگر پسا دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

وهاب سرفرازی

استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

علیرضا خالو

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

محسن فرازمنند

کارشناس ارشد دانشکده مهندسی معدن، گروه مکانیک سنگ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بافق

عده دار مکاتبات: haerihadi@gmail.com

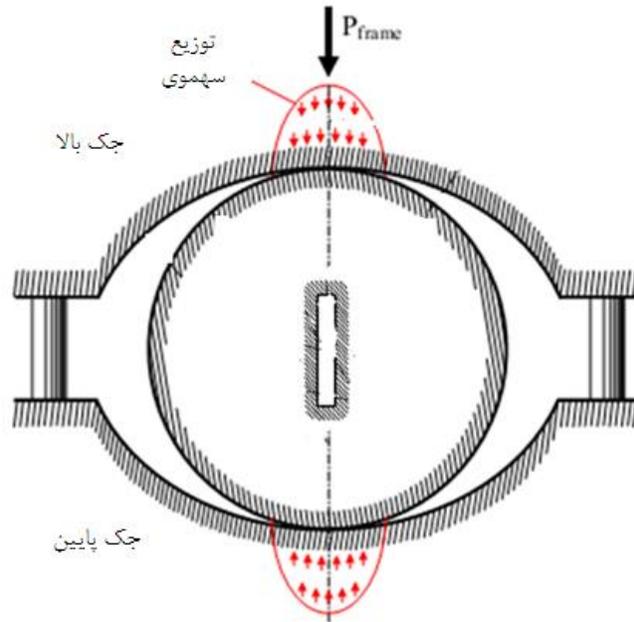
چکیده

در این مقاله با استفاده از کد جریان ذره دو بعدی و آزمایشهای چقرمگی مود بازشونده ترک در بتن توسط آزمایش دیسک برزیلی درزه دار تعیین و نتایج مدلسازی و یافته های آزمایشگاهی مقایسه شدند. به این منظور دو نمونه دیسکی بتنی به قطر ۵۴ mm و ضخامت ۲۷ mm آماده شد. این نمونه دارای یک درزه مرکزی به طول ۲۰mm و بازشدگی ۱ mm است. نمونه ها از ترکیب آب، شن ریزدانه و سیمان با نسبت ۱-۰/۵-۱ ساخته می شود. نمونه دیسکی شکل تحت بارمحوری قرار میگیرد. شبیه سازی عددی توسط کد جریان ذره دوبعدی نیز برای اعتبار سنجی نتایج آزمایشگاهی انجام شد. نتایج نشان میدهد که ترک از نوک درزه ایجاد شده و به موازات بارگذاری رشد کرده و به لبه نمونه متصل می شود. این الگوی رشد ترک در تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی است. چقرمگی شکست بدست آمده از دو روش آزمایشگاهی و عددی نیز با یکدیگر مشابه هستند. واژه کلیدی: چقرمگی شکست مود بازشونده، دیسک برزیلی شیاردار، کد جریان ذره

برای ترک های موجود در سازه ها سه نوع شکست را میتوان متصور شد: نوع اول (مد باز شونده^۱)، جابجایی سطح ترک عمود بر سطح ترک می باشد. نوع دوم (مد لغزشی^۲)، جابجایی سطح ترک در صفحه ترک اما عمود بر لبه ترک می باشد. نوع سوم (پارگی^۳)، جابجایی سطح ترک در صفحه ترک ولی موازی لبه ترک می باشد. پدیده رشد ترک در بتن مسأله پیچیده‌ای است و اغلب نیازمند تکنیک‌های پیشرفته‌ای جهت پیش‌بینی هندسه شکست می‌باشد. فرایند شکست با ایجاد ترک شروع می‌شود که وابسته به چقرمگی شکست است و بنابراین دقت هرگونه مدل‌سازی و نتایج آن به مقدار چقرمگی شکست بتن بستگی دارد. از این رو تعیین مقدار چقرمگی شکست اهمیت ویژه‌ای دارد. اولین تحقیقات توسط کاپلن [۱] بر مکانیک شکست خطی بتن انجام شد. محققانی همچون شاه و مک گری [۲] نشان دادند که استفاده از مکانیک شکست خطی در محاسبه ضریب شدت تنش بتن به نتایج مناسبی منتج نمی‌شود. اشمیت مقدار چقرمگی شکست بتن را بر مبنای روش استاندارد^۴ی که برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست مواد فلزی پیشنهاد شده بود، تعیین نمود [۳ و ۴]. به دنبال آن کارهای آزمایشگاهی فراوانی جهت تعیین چقرمگی شکست بتن با استفاده از نمونه‌هایی متفاوت صورت گرفت [۵، ۶، ۷]. صحت نتایج روش‌های تست تدوین شده نیازمند نمونه‌هایی با ابعاد هندسی بزرگ و هزینه‌های گران ماشین‌کاری بود که در عمل تهیه آنها از مواد سنگی گاهی غیرممکن و یا غیرعملی بود تا اینکه نمونه‌های دارای شکاف V شکل معرفی شدند که نسبت به سایر نمونه‌ها مزایای متعددی داشتند [۸]. جهت تعیین چقرمگی شکست مد I بتن سه آزمایش استاندارد معرفی کرده است. تست اول، آزمایش بارگذاری کششی بر نمونه، آزمایش دوم، آزمایش بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای بر نمونه و آزمایش سوم، آزمایش بارگذاری فشاری قطری بر نمونه می‌باشد [۹، ۱۰]. همزمان با مطالعات آزمایشگاهی، مدل‌سازی‌های عددی متعددی بر فرایند شروع و رشد ترک صورت گرفته است و نتایج آزمایشگاهی با تحلیل‌های اجزاء محدود اعتبارسنجی شده است [۹، ۱۰]. به‌منظور تعیین چقرمگی شکست ماده سنگی توسط هر یک از نمونه‌های آزمایشگاهی فوق‌الذکر لازم است که رابطه موجود بین ضریب شدت تنش K_I با بار اعمالی بر نمونه محاسبه گردد. برای قطعات و نمونه‌های ساده روابط تحلیلی برای ضریب شدت تنش موجود می‌باشد. ولی برای نمونه‌های آزمایشگاهی پیچیده‌تر استفاده از روش‌های عددی مانند روش اجزاء محدود اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. روشهای مختلفی برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست کششی (مود I) و چقرمگی شکست برشی (مود II) ارائه شده است. اینگرافیا [۱۱] با استفاده از روش المان محدود رشد ترک را بررسی نمود و واژه‌های رشد پایدار و ناپایدار ترک را ارائه نمود. اینگرافیا [۱۲] با استفاده از تئوری دانسیته انرژی کرنشی به بررسی رشد ترک پرداخت. لیم [۱۳] با استفاده از تست خمش سه نقطه‌ای چقرمگی شکست را مطالعه نمود؛ هرچند یکی از معایب این روش آماده سازی نمونه‌های بزرگ مقیاس می‌باشد. اتکینسون [۱۴] با استفاده از آزمایش برزلی، رشد ترک های ترکیبی برشی- کششی را شناسایی نمود. چانگ [۱۵] با استفاده از نمونه‌های دیسکی شکل، رشد ترک های کششی، برشی و ترکیبی را بررسی نمود. شتی [۱۶] با استفاده از آزمایش دو محوره ترک های ترکیبی را در مدل پیش بینی نمود. خان [۱۷] تاثیر هندسه نمونه را بر مود شکست بررسی کرد. ماکاگنو [۱۸] رشد ترک مود بازشونده، برشی و ترکیبی را در صفحات پلیمری مطالعه نمود. هی [۱۹] با استفاده از آزمایش برش چهار نقطه‌ای رشد ترک ترکیبی (کششی-برشی) را شناسایی کرد. سورش [۲۰] چقرمگی شکست مواد سرامیکی را تعیین کرد. هوانگ [۲۱] چقرمگی شکست برخی سنگ های شکننده را بدست آورد. بوچهلز [۲۲] بطور آزمایشگاهی و عددی رشد ترک ترکیبی را در آزمایش کشش-برش بررسی نمود. ماهاجان [۲۳] رشد ترک ترکیبی را بطور آزمایشگاهی مطالعه کرد. بنکس [۲۴] بطور تئوری و آزمایشگاهی رشد ترک ترکیبی را بررسی نمود. چانگ [۲۵ و ۲۶] نمونه با

- 1 . Opening Mode
- 2 . Sliding Mode
- 3 . Tearing Mode

هندسه ویژه ای را برای تعیین چقرمگی شکست ارائه داد و همچنین چقرمگی شکست را در لایه بندی ها تعیین کرد. سینک [۲۷] بطور آزمایشگاهی و عددی چقرمگی شکست سنگ آهک را بدست آورد. آزمایش دیسک برزیلی درزه دار یکی دیگر از روشهای اندازه گیری چقرمگی شکست مود بازشونده است (شکل ۱) [۱۲]. حائری و همکاران [۲۸-۳۱] رشد ترک را از نمونه درزه دار مطالعه نمودند.



شکل ۱- تست برزیلی درزه دار

زمانیکه نمونه دیسکی تحت بار خارجی قرار میگیرد، تمرکز تنش در نوک درزه ایجاد می شود. زمانیکه تمرکز تنش به حد بحرانی رسید، ترک از نوک درزه رشد می کند. چقرمگی شکست براساس تمرکز تنش نوک درزه محاسبه می شود. با استفاده از رابطه ۱ می توان چقرمگی شکست را محاسبه نمود [۳۲ و ۱۲].

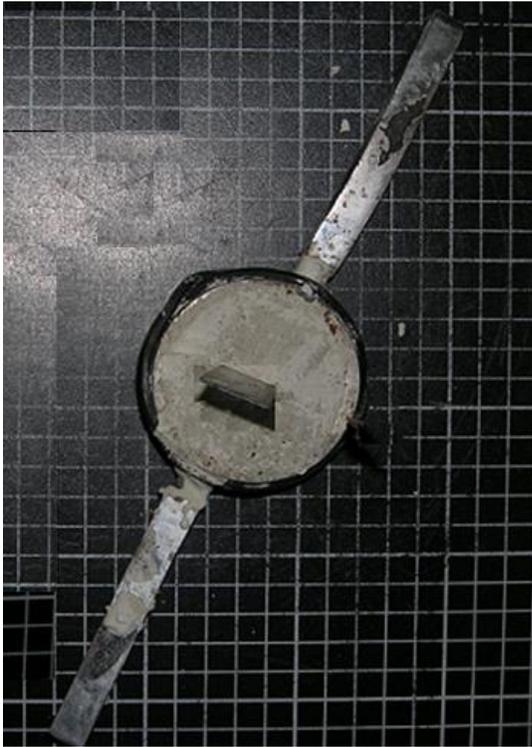
$$KIC = \frac{P \sqrt{a}}{RB \sqrt{\pi}} NI \quad (1)$$

$$NI = 1 - 4\sin^2\theta + 4\sin^2\theta(1 - 4\cos^2\theta)(a/R)^2 \quad (2)$$

KIC چقرمگی مود بازشونده ترک در بتن، a طول ترک، R شعاع دیسک برزیلی، B ضخامت دیسک، P بار شکست و NI ضریب بدون بعد است که به a / R بستگی دارد و θ زاویه قرارگیری درزه نسبت به محور بارگذاری است. در این مقاله چقرمگی شکست بتن با آزمایش بر نمونه برزیلی درزه دار محاسبه و نتایج آزمایشگاهی با شبیه سازی عددی کد جریان ذره مقایسه شد.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

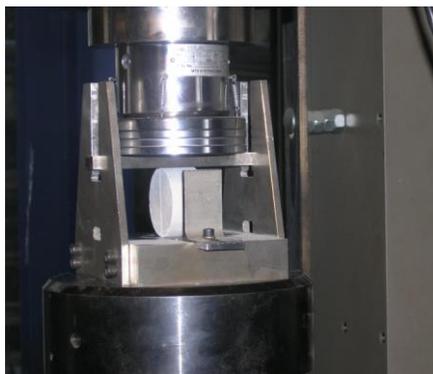
به منظور تعیین چقرمگی شکست بتن، نمونه دیسکی شکل حاوی درزه مرکزی ساخته شد. بنابراین دوغاب بتنی از ترکیب آب، شن و سیمان با نسبت ۱-۰/۵-۱ ساخته شد. این نسبتها به منظور انجام امور پژوهشی پیشنهاد شده است [۳۳]. این دوغاب در قالبهای دیسکی به قطر ۵۴mm و ضخامت ۲۷mm وارد می شود. در قالب یک تیغه به طول ۲۰mm و ضخامت ۱mm جایگذاری شده است. بعد از گذشت ۷ ساعت از قرارگیری دوغاب در قالب، تیغه از قالب خارج شده و یک درزه به طول ۲۰mm بجا می گذارد (شکل ۲).



شکل ۲- نمونه دیسکی حاوی درزه مرکزی به طول ۲۰mm

۱-۲- مراحل انجام آزمایش

یک دستگاه بارگذاری ۳۰ تنی بار فشاری را به قالب های دستگاه برزبلی اعمال می کند (شکل ۱). سلول بار الکترونیکی افزایش بار را ثبت می کند. نرخ بارگذاری بر نمونه ها 0.2 MPa/s می باشد. این نرخ در محدوده پیشنهاد شده توسط استاندارد BS1881- 117 [۳۴] می باشد. علاوه بر نمونه های دیسکی شکل حاوی درزه، نمونه های بکر دیسکی شکل نیز برای تعیین مقاومت کششی بتن آماده سازی شد. با استفاده از ماشین آزمایش تک محوره، آزمایش های مذکور انجام شد (شکل ۳).



شکل ۳- ماشین آزمایش تک محوره

مقادیر مقاومت کششی بتن و چقرمگی شکست بتن (رابطه ۱) در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر مقاومت کششی و چقرمگی شکست بتن

مقاومت کششی MPa	۵
چقرمگی شکست مود بازشونده $MPa\sqrt{m}$	۱/۳

شکل ۴ الگوی شکست نمونه های دیسکی حاوی درزه مرکزی را نشان می دهد. ترک از نوک درزه ایجاد شده و به موازات بارگذاری رشد کرده و به لبه نمونه متصل می شود.



(ب)



(الف)

شکل ۴- الگوی شکست نمونه های دیسکی حاوی درزه مرکزی

۳- معرفی نرم افزار کد جریان ذره

کد جریان ذره دوبعدی، یک کد اجزا مجزا است که سنگ را با مجموعه ای از دیسک های به هم چسبیده مدل می کند. این دیسکها می توانند نسبت به یکدیگر جابجایی داشته و در فصل مشترک، با یکدیگر اندرکنش داشته باشند. میزان جابجایی و اندرکنش نیروها توسط روش تفاضل محدود محاسبه می شود [۳۵]. این روش در شناسایی شکست توانا بوده و پیچیدگی های محاسباتی ندارد [۳۶]. تماس بین ذرات توسط اتصال های خطی یا غیرخطی معرفی می شود. اتصال خطی، که در این مقاله از آن استفاده شده است، رابطه الاستیک را بین تغییر شکل و نیروهای اعمال شده به دیسکها مهیا می نماید. دیسکها در کد جریان ذره در یک نقطه به یکدیگر متصل می شوند که در فصل مشترک آنها فنرهایی با سختی نرمال و برشی قرار دارد. زمانیکه مدل تحت بار خارجی قرار می گیرد، در محل تماس دو دیسک جابجایی ایجاد می شود. این جابجایی باعث اعمال نیرو به فنرها می شود که این نیرو برابر است با حاصلضرب جابجایی در سختی فنر ها. همچنین زمانیکه چرخش در دیسک ها ایجاد می شود، این چرخش نیز باعث جابجایی در محل تماس شده و منجر به اعمال نیرو در فنر ها می گردد. زمانیکه تنش حاصل از این نیرو ها بر مقاومت فنر ها غلبه کند، آن فنر گسیخته شده و یک شکستگی ایجاد می گردد. در کد جریان ذره مقاومت فنرها با دو اتصال تماسی و موازی معرفی می شود. مدل اتصال موازی که در این مقاله از آن استفاده شده است با مشخصه های زیر معرفی می گردد؛ مدول یانگ دیسکها، نسبت سختی نرمال به سختی برشی دیسک، ضریب اصطکاک دیسک، مقاومت نرمال اتصال موازی، مقاومت برشی اتصال موازی، نسبت انحراف استاندارد به انحراف میانگین

مقاومت نرمال، نسبت انحراف استاندارد به انحراف میانگین مقاومت برشی، مینیمم شعاع دیسک‌ها، ضریب افزایش دهنده شعاع دیسک، مدول یانگ اتصال موازی دیسک‌ها و نسبت سختی نرمال به سختی برشی اتصال موازی. با انتخاب مناسب این میکروپارامترها می‌توان مدل عددی را بگونه‌ای کالیبره نمود که رفتار نمونه طبیعی را داشته باشد. در ادامه مراحل آماده سازی مدل عددی، تعیین میکروپارامترهای فوق و کالیبراسیون مدل، آماده سازی مدل‌های اصلی، انواع هندسه تیغه‌ها و نحوه بارگذاری مدل ارائه گردیده است.

۱-۳- مراحل شبیه سازی مدل عددی اولیه

بطور کلی آماده سازی مدل در نرم افزار شامل ۵ مرحله می‌باشد که عبارتند از: ایجاد مرزهای مدل و تولید دیسک‌ها با ابعاد مورد نظر، فشردگی اولیه ذرات، اعمال تنش ایزوتروپیک و کاهش تعداد ذرات معلق و اعمال پیوندهای موازی.

۲-۳- مراحل کالیبراسیون مدل

بعد از ساخت مدل اولیه بایستی مدل را کالیبره نمود. به عبارت دیگر باید میکروپارامترهای معرفی شده فوق را بگونه‌ای تعیین کرد که رفتار مکانیکی مدل عددی (مقاومت کششی) و نمونه آزمایشگاهی یکسان گردد. با سعی و خطا، میکروپارامترها بگونه‌ای انتخاب شدند که مدل‌های عددی با مقاومت کششی مورد نظر حاصل شود (جدول ۲).

جدول ۲- میکروپارامترهای مورد نیاز برای ساخت مدل عددی با مقاومت کششی 5 MPa .

مقدار	میکروخصوصیات	مقدار	میکروخصوصیات
۱	افزایش دهنده شعاع اتصال موازی	دیسکی	نوع ذره
۵	مدول یانگ اتصال موازی (GPa)	۲۶۰۰	دانسیته (kg/cm^3)
۳	نسبت سختی های اتصال موازی	۰/۲۷	مینیمم شعاع دیسک (mm)
۰/۵	ضریب اصطکاک	۱/۷۶	نسبت مینیمم شعاع به ماکزیمم شعاع دیسک
۲۹	مقاومت نرمال اتصال موازی، میانگین (MPa)	۰/۰۸	نسبت تخلخل
۷/۲۵	مقاومت نرمال اتصال موازی، انحراف استاندارد (MPa)	۰/۷	ضریب میرایی (α)
۲۹	مقاومت برشی اتصال موازی، میانگین (MPa)	۵	مدول یانگ تماسی (GPa)
۷/۲۵	مقاومت برشی اتصال موازی، انحراف استاندارد (MPa)	۳	نسبت سختی های اتصال تماسی

نوع ذره دیسکی بوده و نسبت قطر بزرگترین دانه به قطر کوچکترین دانه بزرگتر از ۱/۷۶ انتخاب می‌شود. نسبت تخلخل مدل ۰/۰۸ انتخاب شده است تا سیستم متراکم شده‌ای از ذرات مهیا گردد. افزایش دهنده شعاع اتصال موازی $\bar{\lambda}$ برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. این نشان می‌دهد که سیمان به طور کامل فضای بین ذرات بهم‌چسبیده را اشغال کرده است. چنانچه $\bar{\lambda}$ برابر صفر انتخاب گردد، رفتار به سمت مواد دانه‌ای میل می‌کند. ضریب میرایی (α) برابر با ۰/۷ انتخاب شده که گویای شرایط استاتیکی آنالیز می‌باشد. مقادیر دانسیته و اصطکاک سطح تماس دیسک‌ها برابر مقادیر آزمایشگاهی و یا مقداری نزدیک به آن انتخاب می‌گردد یعنی $2600\text{ (kg/m}^3\text{)}$ و ۰/۵. خصوصیات فوق در حین کالیبراسیون ثابت هستند. از آنجاییکه مدل عددی در این شبیه سازی بایستی نماینده سنگ سیمان باشد لذا از اتصال‌های تماسی- موازی بین دیسک‌ها استفاده می‌شود. برای تعیین خصوصیات

میکرومکانیکی اتصالهای تماسی- موازی نظیر مدول یانگ تماسی E ، نسبت سختی های اتصال تماسی $\left(\frac{k_n}{k_s}\right)$ ،

مدول یانگ اتصال موازی \bar{E} ، نسبت سختی های اتصال موازی $\left(\frac{\bar{k}_n}{\bar{k}_s}\right)$ ، میانگین مقاومت نرمال اتصال موازی

σ_c (mean)، میانگین مقاومت برشی اتصال موازی τ_c (mean)، انحراف استاندارد مقاومت برشی اتصال موازی σ_c (std. dev.) و انحراف استاندارد مقاومت نرمال اتصال موازی τ_c (std. dev.)، بایستی در کوشش های

متوالی خصوصیات میکرو مکانیکی اتصالها را تغییر داد تا رفتار تک محوره، سه محوره و برزلی مدل کالیبره گردد (در آزمایش تک محوره بایستی مدول الاستیک، ضریب پواسون، تنش شروع ترک و مقاومت تک محوره کالیبره گردد؛ در آزمایش سه محوره بایستی پوش هوک-براون کالیبره شود و در آزمایش برزلی مقاومت کششی مدل با نمونه آزمایشگاهی کالیبره خواهد شد). نرخ بارگذاری نمونه در انواع آزمایش ها 0.16 m/s انتخاب شده است. این نرخ به اندازه کافی کوچک می باشد تا نمونه در تعادل شبه استاتیکی باقی بماند.

در کالیبراسیون آزمایش تک محوره، مدول یانگ 50% و نسبت پواسون 50% بطور همزمان کالیبره می شوند و سپس مقاومت نهایی و تنش شروع ترک کالیبره می گردند.

الف- کالیبراسیون مدول یانگ 50%

برای کالیبره کردن مدول یانگ 50% ، بایستی مدول یانگ دانه ها و سیمان شدگی بطور صحیح انتخاب شود. به این منظور، مدول های یانگ تماسی (E) و موازی (\bar{E}) مشابه یکدیگر در نظر گرفته می شود تا تعداد پارامترهای آزاد کاهش یابد. میکروپارامتر مدول یانگ تماسی و موازی، بگونه ای انتخاب می شوند که میکروپارامتر مدول یانگ حاصل از آزمایش عددی با مدول یانگ آزمایشگاهی برابر گردد. در اولین تخمین، میکرومدولهای ورودی برابر با مدول یانگ آزمایشگاهی در نظر گرفته می شوند. اگر نتیجه کالیبراسیون رضایت بخش نبود، مقادیر میکرو مدولها (مادامیکه با یکدیگر برابر هستند) تغییر کرده تا اینکه در تکرارهای بعدی نتیجه قابل قبول حاصل گردد. مدول یانگ 50% یا E_{50} ، از تقسیم 50 درصد تنش ماکزیمم بر کرنش محوری معادل آن محاسبه می شود.

ب- کالیبراسیون نسبت پواسون 50%

نسبت پواسون مدل توسط میکروپارامترهای سختی نرمال و برشی دانه ها و سیمان شدگی کنترل می شود. نسبت سختی نرمال به برشی دانه ها $\left(\frac{kn}{ks}\right)$ و سیمان $\left(\frac{\bar{kn}}{\bar{ks}}\right)$ برابر یکدیگر انتخاب می شود تا تعداد پارامترهای آزاد کالیبراسیون کاهش یابد. در اولین تخمین، مقدار این نسبتها کوچکتر از 3 انتخاب می گردد. اگر نتیجه کالیبراسیون رضایت بخش نبود، مقادیر نسبت سختی نرمال به برشی دانه ها و سیمان را (مادامیکه با یکدیگر برابر و کوچکتر از 3 است) تغییر داده تا اینکه در تکرارهای بعدی نتیجه قابل قبول حاصل گردد. از قدرمطلق حاصل تقسیم میزان کرنش جانبی منطبق با 50 درصد تنش ماکزیمم بر کرنش محوری منطبق با 50 درصد تنش ماکزیمم، نسبت پواسون 50 درصد یا ν_{50} به دست می آید. گفتنی است که مدول یانگ مدل تحت تاثیر میکروپارامترهای سختی نرمال و برشی دانه ها قرار نمی گیرند. بعبارت دیگر با تغییر نسبت سختی نرمال به برشی دانه ها $\left(\frac{kn}{ks}\right)$ و سیمان $\left(\frac{\bar{kn}}{\bar{ks}}\right)$ ، مدول یانگ 50% تغییر نخواهد کرد.

ج- کالیبراسیون مقاومت نهایی و تنش شروع ترک

برای کالیبراسیون مقاومت نهایی مدل، بایستی انحراف میانگین مقاومت های نرمال $\bar{\sigma}_c$ (mean) و برشی $\bar{\tau}_c$ (mean) را تنظیم نمود در حالیکه تنش شروع ترک، توسط انحراف استاندارد مقاومت های نرمال σ_c (std. dev.) و برشی τ_c (std. dev.) کالیبره می شوند.

ج-۱- کالیبراسیون مقاومت نهایی مدل: در پروسه کالیبراسیون، ابتدا مقاومت نهایی مدل، کالیبره می‌گردد. به این ترتیب که مقادیر انحراف استاندارد مقاومت های نرمال و برشی ($\bar{\sigma}_c (std. dev.)$ و $\bar{\tau}_c (std. dev.)$) برابر صفر انتخاب شده و مقادیر انحراف میانگین آنها ($\bar{\sigma}_c (mean)$ و $\bar{\tau}_c (mean)$) تا کالیبره شدن مقاومت، تغییر داده می‌شوند. باید توجه داشت که نسبت انحراف میانگین مقاومت نرمال به برشی، رفتار مدل را تحت تاثیر قرار می‌دهد بنابراین این نسبت در طی کالیبراسیون ثابت نگه داشته می‌شود. چنانچه مقاومت نهایی مدل در اولین کوشش کالیبره نگردد، مقادیر مقاومت‌های نرمال و برشی به یک میزان زیاد و یا کم می‌شود (با توجه به اولین مقاومت گرفته شده از مدلسازی) تا جایی که مقاومت تک محوره عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر قابل تطبیق گردند.

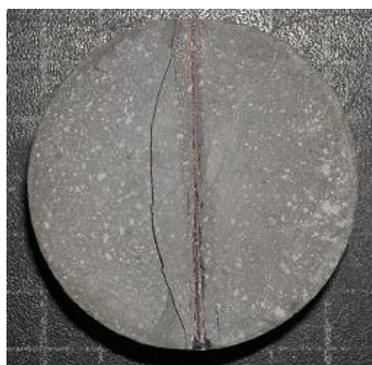
ج-۲- کالیبراسیون تنش شروع ترک: بعد از کالیبره شدن مقاومت تک محوره، انحراف استاندارد مقاومت اتصالها ($\bar{\sigma}_c (std. dev.)$ و $\bar{\tau}_c (std. dev.)$) تا زمانیکه تنش شروع ترک کالیبره گردد، تغییر داده می‌شود (انحراف استاندارد مقاومت نرمال $\bar{\sigma}_c (std. dev.)$ با انحراف استاندارد مقاومت برشی $\bar{\tau}_c (std. dev.)$ در طی کالیبراسیون برابر است). این تغییرها ممکن است مقاومت نهایی را تغییر دهد که در این صورت چندین تکرار بین این مرحله و مرحله قبل ضروری می‌باشد.

تنش شروع ترک در آزمون آزمایشگاهی، تنشی است که کرنش حجمی ترک (کرنش حجمی پلاستیک) از آن تنش آغاز می‌شود. کرنش حجمی ترک با کاهش کرنش حجمی الاستیک از کرنش حجمی کل محاسبه می‌گردد. به این ترتیب می‌توان تنش شروع ترک آزمایشگاهی را تعیین نمود. مادامیکه این روش برای اندازه گیری تنش شروع ترک در تستهای آزمایشگاهی کاربرد دارد، معیار قابل قبولی برای استفاده در مدلسازی اجزا مجزا نمی‌باشد؛ زیرا پاسخ حجمی در شرایط دوطرفه، قابل تطبیق با شرایط سه بعدی آزمایشگاهی نمی‌باشد. تنش شروع ترک در آزمایش تک‌محوره اجزا مجزا تنشی است که ۱٪ از کل ترکها تحت آن تنش ایجاد شده باشد.

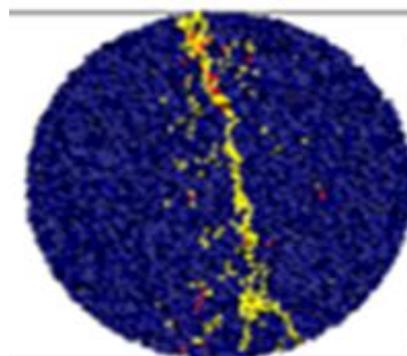
د-انجام آزمایش برزیلی و سه محوره

بعد از کالیبراسیون آزمایش تک محوره بایستی با در اختیار داشتن میکروپارامترهای تعیین شده، آزمایش برزیلی و سه محوره نیز بر روی مدل دیسکی و استوانه ای انجام داد تا مقاومت کششی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مدل با نمونه آزمایشگاهی همسان گردد. چنانچه با استفاده از میکروپارامترها، این امر محقق شد کالیبراسیون کامل شده است؛ در غیر این صورت بایستی میکروپارامترها را مجدداً برای دستیابی به ماکروخصوصیات ایده ال تغییر داد. بعد از انتخاب میکروپارامترهای مناسب، از آنها برای آزمایش برش مستقیم استفاده می‌شود.

شکل ۵-الف و ب الگوهای شکست مدل های عددی و نمونه های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. خطوط زرد رنگ (رنگ روشن) و قرمز رنگ (رنگ تیره)، نشان دهنده ترک های کششی و ترک های برشی می‌باشند. بطور کلی الگوهای شکست مدل های عددی مشابه الگوی شکست نمونه های آزمایشگاهی می‌باشد.



(ب)

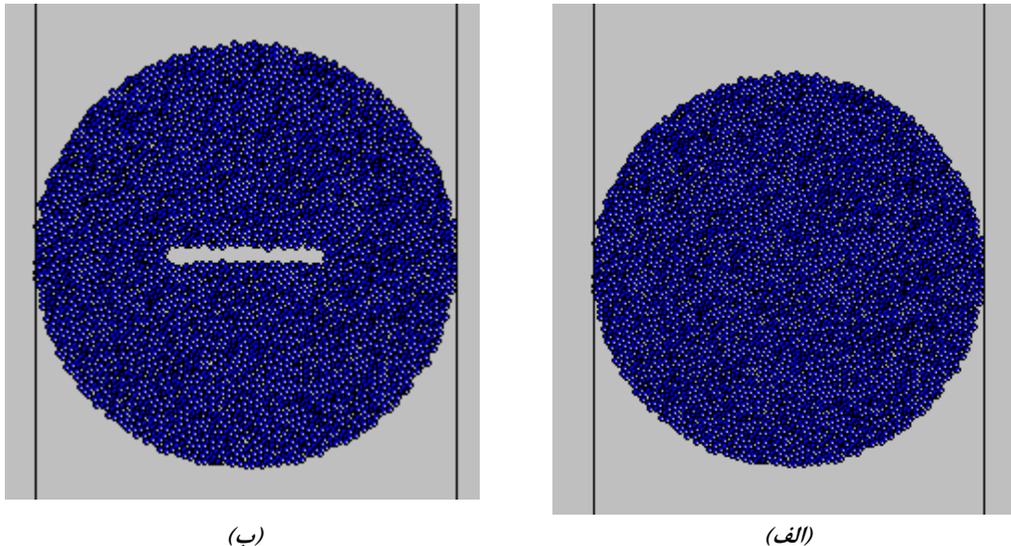


(الف)

شکل ۵- الگوی شکست در الف) مدل های عددی و ب) نمونه آزمایشگاهی

۳-۳-آماده سازی مدل اصلی

بعد از کالیبراسیون مدل، مدل های عددی با قطر ۵۴ mm میلی متر ساخته شد (شکل ۶-الف). این مدل دارای ۱۳۴۵۶ دیسک می باشد. به منظور مهیا ساختن شرایط آزمایش، یک نوار افقی به ضخامت ۱ میلی متر و طول ۲۰ میلی متر از مدل حذف گردید (شکل ۶-ب).



شکل ۶-الف) نمونه دیسکی بکر، ب) نمونه دیسکی حاوی درزه مرکزی

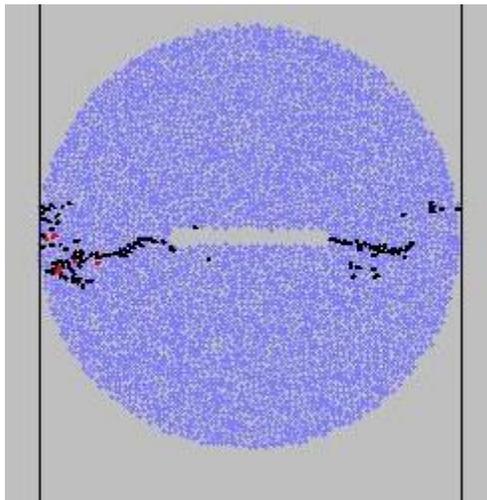
۳-۴-بارگذاری مدل ها:

اعمال تنش در برنامه اجزا مجزا توسط دیوارهای مدل انجام می شود (شکل ۵-ب). سختی نرمال و برشی دیوارها، ۲ برابر سختی دیسکها انتخاب می شود تا دیوارها نسبت به مدل سخت تر باشند و صلابت آزمایش حفظ شود. زاویه اصطکاک دیوارها در مدل صفر انتخاب می شود تا اصطکاک بین دیوار و مدل ایجاد نشود. صفحات جانبی، وظیفه بارگذاری به دیسکها را برعهده دارد. در تمام آزمایشها، نرخ بارگذاری استاتیکی دیوار برابر 0.2 m/s در نظر گرفته می شود. با حرکت صفحه سمت چپ و راست به سمت یکدیگر، شکست در نمونه ایجاد می شود. در ادامه توزیع نیروهای داخلی و نحوه شکست سنگ مطالعه می گردد.

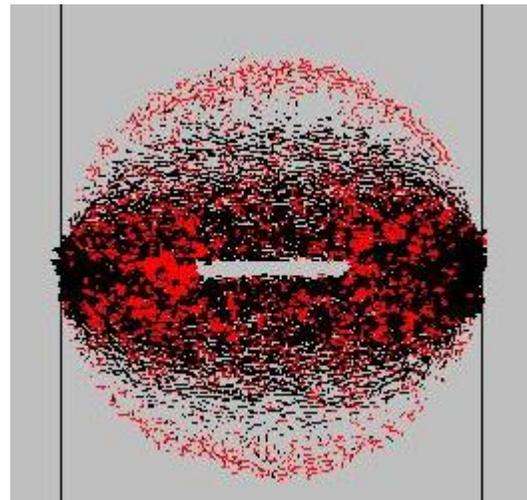
۴-۴-بحث و نتیجه گیری

۴-۱- توزیع نیروهای فشاری و کششی داخلی مدل در لحظه شروع ترک

شکل ۷-الف توزیع نیروهای فشاری و کششی داخلی را در لحظه شروع ترک نشان می دهد. خطوط قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب نشان دهنده نیروهای کششی و فشاری می باشند. ضخامت این خطوط بیانگر بزرگی نیرو است. شکل ۷-الف نشان می دهد که ضخامت خطوط قرمز رنگ در نوک درزه زیاد می باشد. این بدان معناست که تمرکز تنش کششی در نوک درزه اتفاق افتاده است. به عبارت دیگر، کد جریان ذره این توانایی را دارد که تمرکز تنش کششی را پیرامون سطوح ضعف در نمونه شناسایی نماید. در محل اتصال مدل به صفحات بارگذاری، زنجیره های نیرو تیره رنگ می باشد که این بیانگر تمرکز تنش فشاری در این محدوده است. بطور کلی می توان نتیجه گیری کرد که بدلیل تمرکز تنش کششی در نوک درزه، ترک های کششی از این مناطق رشد خواهند کرد.



(ب)



(الف)

شکل ۷- توزیع نیروهای فشاری و کششی داخلی را در لحظه شروع ترک

۲-۴- الگوی شکست نمونه های دیسکی حاوی درزه مرکزی

شکل ۷-ب الگوی شکست مدل های عددی را نشان می دهد. ترک های سیاه و قرمز رنگ به ترتیب بیانگر ترک های کششی و برشی می باشند. از این شکل می توان دریافت که ترک های کششی از نوک درزه ایجاد شده، به موازات محور بارگذاری رشد کرده و به لبه نمونه متصل می شود. این الگوی شکست مشابه الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی می باشد.

۳-۴- تعیین چقرمگی شکست کششی

با تعیین بار شکست مدل عددی و بکارگیری رابطه ۱، چقرمگی شکست مدل عددی محاسبه شد (جدول ۳). به این ترتیب که با جایگذاری زاویه θ برابر با صفر درجه در رابطه (۲) مقدار NI برابر ۱ محاسبه گردید. مقدار NI و همچنین مقدار a برابر با ۰/۰۲ متر، R برابر با ۰/۰۵۴ متر، B برابر با ۱ متر و بار شکست ۸ کیلونیوتن در رابطه ۱ جایگذاری شد و چقرمگی شکست مدل عددی محاسبه گردید که در جدول ۳ نمایش داده شده است. با مقایسه چقرمگی شکست عددی و آزمایشگاهی (جدول ۱)، می توان دریافت که چقرمگی شکست نمونه آزمایشگاهی و عددی تقریباً یکسان است که این بیانگر توانایی PFC در محاسبه چقرمگی شکست می باشد.

جدول ۳- چقرمگی شکست کشش مدل عددی

۱/۲	چقرمگی شکست مود بازشونده $MPa\sqrt{m}$
-----	----------------------------------------

۵- نتیجه گیری

در این مقاله الگوی شکست و چقرمگی مود بازشونده ترک در بتن توسط آزمایش دیسک برزیلی درزه دار توسط کد جریان ذره دوبعدی، تعیین شد و نتایج مدلسازی عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد که:

-در مدل های عددی تمرکز تنش کششی در نوک درزه اتفاق می افتد و تنش فشاری ماکزیمم در زیر صفحات بارگذاری متمرکز می گردد.

-ترک های کششی از نوک درزه در مدل عددی ایجاد شده و به موازات محور بارگذاری رشد کرده و به لبه مدل متصل می شود.

-این الگوی رشد ترک در تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی است. چقرمگی شکست بدست آمده از دو روش نیز با یکدیگر مشابه هستند

-مقاومت کششی $3/8$ برابر چقرمگی شکست کششی است.

-الگوی شکست و چقرمگی شکست در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی یکسان است.

قدردانی

شایسته است از همکاری و هم اندیشی گروه محترم مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف و آزمایشگاه مجهز دینامیک ساز دانشگاه صنعتی شریف که تمامی آزمایشات انجام شده این پروژه با استفاده از امکانات و تجهیزات به روز آن آزمایشگاه محترم محقق گردیده است نهایت سپاس را دارم.

مراجع

1. Kaplan, M (1961) *Crack propagation and the fracture of Concrete*, American Concrete Institute *ACI. J.*, 58 (5), 591-610.
2. Shah, S. P., and Mac-Garry, F. J. (1971). *Griffith fracture criterion and concrete. J of Eng Mec Division, Vol, 97: 1663-1676.*
3. Broek D. (1982). *Elementary engineering fracture mechanics. Martinus nijhoff publishers, Boston.*
4. Schmidt, R. A. (1976). *Fracture toughness testing of Limestone, Expl. Mech., 16, 161-167.*
5. Clifton, R. J. Simonson, E. R., Jones, A. H. & Green, S. J. (1976). *Determination of the critical stress intensity factor, KIC, from internally pressurized thick-walled vessels, Expl. Mech., 16: 233- 238.*
6. Zoback, M. D. (1978). *A simple hydraulic fracturing technique for determining rock fracture toughness, Proc. 19th U.S. Symp. On Rock Mechanics, University of Nevada, Reno, pp83-85.*
7. Ouchterlony, F. (1982). *A review of fracture toughness testing of rocks, Solid Mechanics Archives, 7, 131-211.*
8. Ouchterlony, F. (1986). *A core bend specimen with chevron edge notch for fracture toughness measurements, Rock Mechanics: Key to Energy Production, Proc. 27th US Symp. On Rock Mech., H. L. Hartman, (Ed.), SME, Littleton Co., pp:177-184.*
9. ISRM (1988). *Suggested methods for determining fracture toughness of rocks, F. Ouchterlony, Int. J. Rock. Mech. Min. sci. & Geomech. Abstr., 25, 71-96.*
10. ISRM (1995). *Suggested methods for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disk (CCNBD) specimens, R. J. Fowell, Int. J. Rock. Mech. Min. sci. & Geomech. Abstr. 32: 57-64.*
11. Ingraffea, A. R. & Heuze, F. E. (1980). *Finite element models for rock fracture mechanics, Int. J. Numl. & Analyl. Meths. Geomech., 4: 25-43.*
12. Ingraffea, A. R. (1976). *Fracture propagation in rock: Laboratory tests and finite element analysis, Proc. 17th US Symp. On Rock Mech. Snowbird, Utah, pp: 5C4-1 – 5C4-1-6.*
13. Lim IL, Johnston IW, Choi SK, Boland JN.O. (1994). *Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending. Part 2—mixed mode. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 31(3):199–212.*
14. Atkinson C, Smelser RE, Sanchez J. (1982). *Combined mode fracture via the cracked Brazilian disc test. Int J Fract;18:279–91.*
15. Chang SH, Lee CI, Jeon S. (2002). *Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc- type specimen. Eng Geol;66:9–97.*
16. Shetty DK, Rosenfield AR, Duckworth WH. (1987). *Mixed-mode fracture in biaxial stress state: application of the diametral-compression (Brazilian disk) test. Eng Fract Mech;26(6):825–40.*

17. Khan K, Al-Shayea NA. (2000). *Effect of specimen geometry and testing method on mixed I-II fracture toughness of a limestone rock from Saudi Arabia. Rock Mech Rock Eng; 33(3):179–206.*
18. Maccagno TM, Knott JF. (1989). *The fracture behaviour of PMMA in mixed modes I and II. Eng Fract Mech; 34(1):65–86.*
19. He MY, Cao HC, Evans AG. *Mixed-mode fracture: the four point shear specimen. Acta Metal Mater 1990; 38:839–46.*
20. Suresh S, Shih CF, Morrone A, O'Dowd NP. (1990). *Mixed-mode fracture toughness of ceramic materials. J Am Ceram Soc ; 73:1257–67.*
21. Huang J, Wang S. (1985). *An experimental investigation concerning the comprehensive fracture toughness of some brittle rocks. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr; 22(2):99–104.*
22. Buchholz FG, Pirro PJM, Richard HA, Dreyer KH. (1987). *Numerical and experimental mixed-mode analysis of a compact tension-shear-specimen. In: Luxmoore et al., editors. Proceedings of the fourth International Conference Numer methods in fracture mechanics. Swansea: Pineridge Press; p: 641–56.*
23. Mahajan RV, Ravi-Chandar K. (1989). *An experimental investigation of mixed-mode fracture. Int J Fract; 41:235–52.*
24. Banks-Sills L, Bortman Y. (1986). *A mixed mode fracture specimen; analysis and testing. Int J of Fract; 30:181–201.*
25. Chong KP, Kuruppu MD. (1984). *New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials. Int J Fract; 26: R59–62.*
26. Chong KP, Kuruppu MD. (1987). *Fracture toughness determination of layered materials. Eng Fract Mech; 28(1) :43–54.*
27. Singh RN, Sun GX. (1990). *A numerical and experimental investigation for determining fracture toughness of Welsh limestone. Min Sci Tech; 10: 61–70.*
28. Haeri H, Khaloo A, Maraji M., (2014). *experimental and numerical analysis of Brazilian discs with multiple parallel cracks. Arab J geosciences, doi 10.1007/s12517-014-1598-1.*
29. Haeri H, Shahriar K, Marji MF, Moaref Vand P. (2014b). *An experimental and numerical study of crack propagation and cracks coalescence in the pre-cracked rock-like disc specimens under compression. int j rock Mecha Min sci 67c:20 28*
30. Haeri H, Shahriar K, Marji MF, Moaref Vand P. (2014c). *On the HDD analysis of micro cracks initiation, propagation and coalescence in brittle substances. Arab J Geosc Pres Accept Manusc. doi: 10.1007/s 1 25 17 -0 14 -1 29 0- 5*
31. Haeri H, Shahriar K, Fatehi Marji M, Moarefvand P. (2014d). *On the crack propagation analysis of rock like Brazilian disc specimens contain-ing cracks under compressive line loading. lat amer J solids struct 11 : 4 0 0 –1416*
32. Griffith AA. (1921). *The phenomena of rupture and flow in solids. The Philosophical Transactions of the Royal Society London (Series A); 221:163- 98 .*
33. Sarfarazi V, Ghazvinian A, Schubert W, Blumel M, Nejati HR. (2014). *Numerical Simulation of the Process of Fracture of Echelon Rock Joints, Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(4), 1355–1371.*
34. BS1881 - 117: (1983). *Testing Concrete - Method for determination of tensile splitting strength. British Standards Institute, London.*
35. Potyondy, D., Cundall, P. (2004). *A bonded-particle model for rock. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, Vol. 41, pp. 1329-1364.*
36. Cundall P (1971). *A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. In: Proceedings of the symposium of international society of rock mechanics, vol 1. Nancy, France. Paper no. II-8.*

Numerical and Experimental Investigation for Determining the Opening Mode Toughness of Concrete Using Cracked Brazilian Disk Test

Hadi Haeri^{1,*}, Vahab Sarfarazi², Alireza Khaloo³, Mohsen Farazmand⁴

1. Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
 2. Department of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran
 3. Distinguished Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
 4. Department of Mining Engineering, Bafgh Branch, Islamic Azad University, Bafgh, Iran
- * Corresponding author: haerihadi@gmail.com

Abstract

In this paper, a simultaneous experimental and numerical analysis of opening mode toughness in The Pre-joined Brazilian disc using Brazilian tests are carried out. These numerical results are compared with the existing experimental results. For this purpose, two concrete disc specimens of 54 mm diameter and 27 mm thick were prepared. These specimens have a central joint of 20 mm in length and an opening in mm 1. Specimens are made from a mixture of water, fine sand, and cement with a ratio of 1-5 / 0-1. The same specimens are numerically simulated by a two-dimensional particle flow code (PFC). The results indicate that the crack formed from the tip of the joint and grows parallel to the load and connects to the edge of the specimen. The Fracture toughness obtained from the numerical method is in good agreement with experimental results.

Key words: Opening-Mode Fracture Toughness, Pre-Cracked Brazilian disk, Code Particle Flow (PFC)